第 10 講　宇宙と素粒子

1

陽電子（e^+）は，電子（e^-）と同じ質量 m，反対符号の正電荷をもつ粒子であり，電子の反粒子とよばれる。このような陽電子と電子が出会い，両者とも消滅し，ガンマ線が放出される対消滅過程を考える。この過程では，陽電子と電子の全てのエネルギーがガンマ線のエネルギーとなる。

アインシュタインの相対性理論によれば，粒子の質量が m であることは，粒子がその質量に対応するエネルギー mc^2 をもつことに相当する。これは静止物体のもつエネルギーという意味で静止エネルギーとよばれる。ここで c は真空中の光の速さである。運動している陽電子，電子それぞれの全エネルギーは，それらの速度に応じて静止エネルギーより大きくなる。しかし，以下の対消滅過程では陽電子，電子の速度は十分小さいので，それらの全エネルギーは静止エネルギーに等しいとしてよい。

ガンマ線のエネルギーと運動量の大きさは，振動数を ν として，それぞれ $h\nu$，$\dfrac{h\nu}{c}$ で与えられる。ここで h はプランク定数である。

対消滅の結果，２本のガンマ線が同時に放出される過程を考える。この過程はすべて xy 平面内（図１，図２）で起こるとする。またここでは一方のガンマ線は x 軸正方向に放出されるとする。対消滅過程でもエネルギーおよび運動量の保存則が成立することを用いて，以下の問いに答えよ。

図１(a)のように，原点 O に静止している陽電子と電子が対消滅し，２本のガンマ線

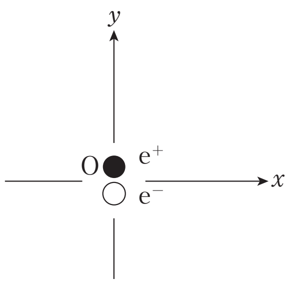
　Ⅰ：運動量の大きさ p_1，振動数 ν_1，

　Ⅱ：運動量の大きさ p_2，振動数 ν_2，

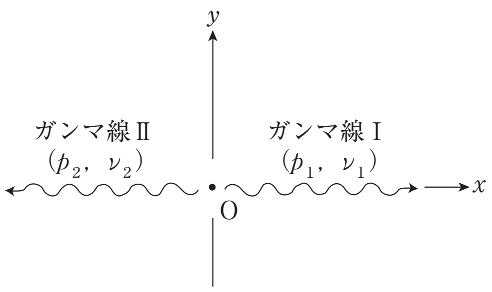
が図１(b)に示すように正反対方向に同時に放出された。

(1)　２本のガンマ線は，なぜ正反対方向に放出されたか，その理由を 120 字程度で述べよ。

(2)　p_1，ν_1 それぞれを c，h，m を用いて表せ。



(a) 対消滅前



(b) 対消滅後

図１

< Note >

次に図２(a)のように，運動している電子が原点に静止している陽電子と出会い，対消滅し，２本のガンマ線が同時に放出された場合を考える。ここで電子の運動量を $\vec{P}$（x 成分 P_x，y 成分 P_y）とおく。ただし図２(b)に示すように，ガンマ線Ａ（運動量の大きさ p_A，振動数 ν_A）は図１(b)の場合のガンマ線Ⅰと同様に x 軸正方向で観測されたが，ガンマ線Ｂ（運動量の大きさ p_B，振動数 ν_B）は x 軸負方向から微小な角度 θ だけずれた方向で観測された。

(3)　P_x，P_y それぞれを p_A，p_B，θ を用いて表せ。

(4)　p_A，p_B それぞれを P_x，m，c を用いて表せ。ここで角度 θ は十分小さく，$\sin\theta \fallingdotseq \theta$，$\cos\theta \fallingdotseq 1$ と見なしてよい。

(5)　x 軸正方向に放出されたガンマ線の振動数を測定することにより，電子の運動量の x 成分 P_x を知ることができる。P_x を $\nu_A - \nu_1$ を含む式で表せ。

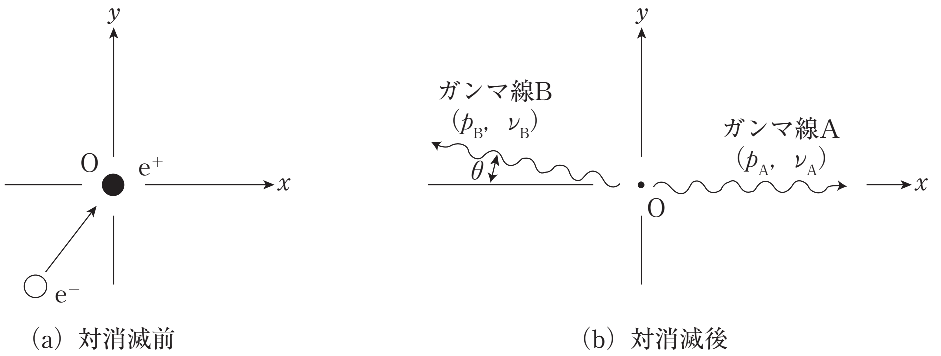


図２

< Note >

2

岐阜県北部の神岡地区には，小柴博士のノーベル物理学賞受賞で有名になったニュートリノ観測装置「スーパー・カミオカンデ」がある。これは，太陽中心部の原子核反応や超新星爆発によって発生する「ニュートリノ」と呼ばれる粒子を検出する装置である。以下の文は，このニュートリノが発見されたいきさつに触れたものである。

問１　以下の文中の□にあてはまる文字式を答えよ。

ある種の原子核は不安定で，β 線と呼ばれる放射線（その正体は電子の流れ）を放出して，原子番号が１つ大きい原子核に変わる β 崩壊を起こす。たとえば，陽子１個と中性子２個とからなるトリチウム（三重水素）の原子核 ${}^3_1\mathrm{H}$ は，次の反応式に従って崩壊する。

$$ {}^3_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \mathrm{e}^- + \nu \qquad \text{(A)} $$

ここで，e^- は電子，ν がニュートリノ（厳密には反ニュートリノ）と呼ばれる粒子である。しかし，ニュートリノは1930年頃にはその存在さえ知られていなくて，この β 崩壊の反応式は

$$ {}^3_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \mathrm{e}^- \qquad \text{(B)} $$

であると考えられていた。

式(B)が正しいとして，静止したトリチウム原子核から放出される電子の運動エネルギー T_e を求めてみよう。粒子の質量と運動量の大きさを，${}^3_2\mathrm{He}$ 原子核は m_A，p_A，電子 e^- は m_e，p_e とすると，運動量保存の法則により ${}^3_2\mathrm{He}$ 原子核と電子は互いに逆方向に放出されるはずだから，

$$ \boxed{\text{ア}} \qquad (1) $$

が成りたつ。崩壊するとき解放されるエネルギー Q はすべて運動エネルギーに変わるので，エネルギー保存の法則から

$$ \frac{{p_\mathrm{A}}^2}{2m_\mathrm{A}} + \boxed{\text{イ}} = Q \qquad (2) $$

が成りたつ。式(1)と(2)を用いて，放出される電子 e^- の運動エネルギー T_e を m_A，m_e および Q だけで表すと

$$ T_\mathrm{e} = \boxed{\text{ウ}} \qquad (3) $$

となる。Q の値は一定なので，電子の運動エネルギー T_e も一定ということになる。ところが，実際に β 崩壊で放出される電子の運動エネルギーを測定してみると，一定でないばかりか，${}^3_2\mathrm{He}$ 原子核の運動エネルギーを加えた全エネルギーも一定にならないことが判明した。一見，エネルギー保存の法則が破られているかのように思われたのである。

1931年，オーストリアの物理学者W．パウリは，極微の世界でもエネルギーと運動量の保存法則は厳密に成立しているものと考え，β 崩壊には，のちにニュートリノと命名された第３の粒子が関与しており，トリチウム原子核は式(A)に従って崩壊するという仮説を提案した。この考えに従うと，放出される３つの粒子の運動方向は一平面内にあり，そのなす角を図のようにする。

＜ Note ＞

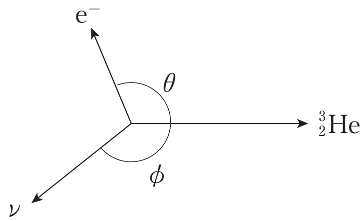


図　β 崩壊の放出角

ニュートリノの質量を m_ν，運動量の大きさを p_ν とすると，運動量保存の法則により次の２つの関係式が導かれる。

[エ]，[オ]　　　　(4)

また，エネルギー保存の法則から，式(2)に代わる次の関係が成りたつ。

[カ] $=Q$　　　　(5)

一般的な取扱いはめんどうなので，以下では $p_\nu=p_A$ の場合を扱う。そのとき，式(4)から，放出される電子と$^3_2$He原子核との運動量の比 $f=\dfrac{p_e}{p_A}$ を，ニュートリノの放出角 ϕ で表すことができ，

$f=$ [キ]　　　　(6)

となる。そこで，式(3)と同様の考えで，電子の運動エネルギーを求めると，

$$T_e=\frac{m_A m_\nu f^2}{(m_A+m_\nu)m_e+m_A m_\nu f^2}Q \qquad (7)$$

となり，T_e は式(3)と違って定数ではなく，ニュートリノの放出角 ϕ の値によって変化することになる。

　このように，ニュートリノの存在を仮定すると，放出される電子の運動エネルギーは一定ではなく，実験事実と矛盾しないことがわかる。しかしニュートリノは電荷を持っておらず，その検出は非常に困難であったため，1959 年になってようやくアメリカのF．ライネスらによって発見され，パウリの考えの正しいことが立証されたのである。

問２　β 崩壊の反応式(A)を用いて，解放されるエネルギー Q [eV] を有効数字２桁で求めよ。ただし，$^3_1$H と $^3_2$He 原子核の質量は，それぞれ 3.015500u と 3.014932u，電子の質量は 0.000549u とし，ニュートリノ ν の質量は無視するものとする。ここでuは原子質量単位で，$1\,\mathrm{u}=1.7\times10^{-27}$kg，電気素量は 1.6×10^{-19}C，真空中の光の速さは 3.0×10^{8}m/s とする。

＜ Note ＞

3

太陽とほぼ同じ質量をもちながら半径は10kmほどしかない高密度の星（中性子星）には，普通の恒星（伴星とよぶ）と万有引力で引きあいながらきわめて近い距離で周回運動するものがある。伴星からこの中性子星に降り積もった水素やヘリウムが核融合反応を起こして爆発することがある。この現象を考察する。

(1)　伴星から流れ出した物質が中性子星に落下する。水素原子が無限遠から中性子星に落下すると考えて，表面に達したときの運動エネルギーを求めよ。ただし，水素原子は無限遠では静止していたとする。また，中性子星の半径を R，中性子星の質量を M，水素原子の質量を m_{H}，万有引力定数を G とする。

(2)　中性子星の表面にたまった水素はX線を放射して運動エネルギーを失う。その水素が核融合反応を起こして爆発した。燃料の水素原子1個あたりどれだけのエネルギーが発生するか。実際の反応は複雑だが，ここではたまった水素の原子核（${}^1_1\mathrm{H}$）はすべて

$$56{}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^{56}_{26}\mathrm{Fe} + 30{}^0_1\mathrm{e}^+ \text{（陽電子）}$$

という核反応で鉄の原子核に変わり，生成される陽電子はすべて電子と衝突してエネルギーに変わるものとする。水素原子の質量を m_{H}，鉄原子の質量を m_{Fe}，光の速さを c とする。

(3)　上の設問(2)において，生成された鉄は単原子の気体になり，爆発で発生したエネルギーは熱となって，生成されたすべての鉄原子に等しく分配されると仮定する。この鉄原子が到達できる中性子星表面からの高さの上限を求めよ。

(4)　核融合によって水素が鉄になって発生したエネルギーは鉄原子の熱運動から電磁波の放射に変換され，爆発的なX線放射（X線バースト）として地球周辺の人工衛星から観測される。また，設問(1)で求めた伴星から水素が降り積もることによって発生するエネルギーは定常的なX線放射として観測される（図1参照）。核融合爆発によって放射されたエネルギー E_1 と前の爆発からこの爆発までの間に定常的に放射されたエネルギー E_2 との比 $\dfrac{E_1}{E_2}$ を有効数字1桁で求めよ。ただし，中性子星の質量 M を 3.0×10^{30}kg，中性子星の半径 R を 1.0×10^{4}m とする。必要に応じて原子核の結合エネルギーのグラフ

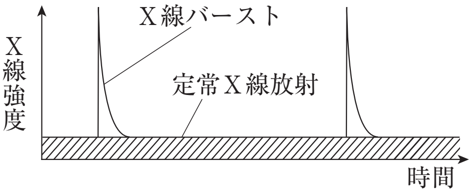


図1　核融合爆発を起こしている中性子星からのX線放射の時間的変化

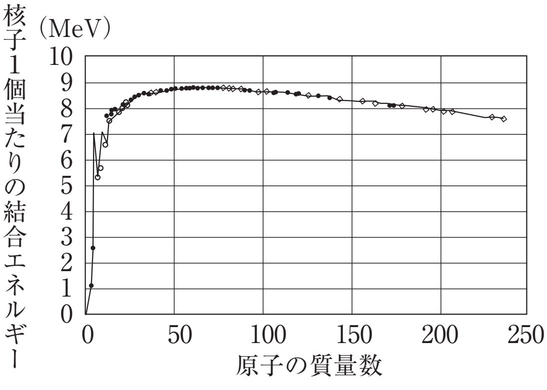


図2　原子核の結合エネルギー

＜ Note ＞

（図２）および以下の物理定数値を用いよ。

電気素量	$e = 1.6\times10^{-19}$C
万有引力定数	$G = 6.7\times10^{-11}$N·m^2/kg^2
光の速さ	$c = 3.0\times10^{8}$m/s
水素原子の質量	$m_{\mathrm{H}} = 1.7\times10^{-27}$kg
電子の質量	$m_{\mathrm{e}} = 9.1\times10^{-31}$kg
中性子と陽子の質量の差	$m_{\mathrm{n}} - m_{\mathrm{p}} = 2.3\times10^{-30}$kg

(5)　太陽とほぼ同じ質量をもちながら地球とほぼ同じ半径をもつ高密度の恒星（白色わい星）の表面でも，伴星から降り積もった水素ガスが突然に核融合反応を起こして，大爆発が起きることがある。このとき，遠方に向かって物質が放出されることが観測されている。しかし，中性子星上の爆発では物質の放出現象はほとんど観測されない。この違いが生じる理由を簡潔に説明せよ。

＜ Note ＞

第10講　確認テスト

中性子の発見に関する，次の文中の□内に入れるのに適当なものを解答群の中からひとつ選べ。

1930年，α 粒子（${}^{4}_{2}\mathrm{He}$）をベリリウムの原子核（${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$）に当てると，未知の放射線が発生する原子核反応が見いだされた。この放射線を水素を含む物質に当てると水素の原子核（${}^{1}_{1}\mathrm{H}$）が飛び出し，窒素ガスに当てると窒素の原子核（${}^{14}_{7}\mathrm{N}$）が飛び出してくることがわかった。${}^{1}_{1}\mathrm{H}$の速さの観測値は最大 $3.3\times10^{7}\,\mathrm{m/s}$ であり，${}^{14}_{7}\mathrm{N}$の速さの観測値は最大 $4.4\times10^{6}\,\mathrm{m/s}$ であった。

この放射線は電場や磁場によって曲がらず，電気的に中性であることがわかった。そのため，この放射線は初めは γ 線（光子）と考えられた。この原子核反応で，γ 線とただ1つの原子核が生じているとすれば，その原子核反応は

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow \boxed{\ 1\ } + \gamma\text{線}$$

と書くことができる。振動数 ν の γ 線が静止している${}^{1}_{1}\mathrm{H}$に最大の速さを与えるのは，γ 線が${}^{1}_{1}\mathrm{H}$の正面から弾性衝突をするときである。この衝突によって γ 線の進行方向は180°変わり，振動数は ν' に変わる。プランク定数を h，真空中の光速を c，${}^{1}_{1}\mathrm{H}$の質量を m_{P}，入射する γ 線の進行方向を正にとって衝突後の${}^{1}_{1}\mathrm{H}$の速度を u_{P} とすると，衝突の前後での運動量の保存より，$\dfrac{h\nu}{c}=\boxed{\ 2\ }$ となる。また，エネルギー保存の法則より，$h\nu=\boxed{\ 3\ }$ である。この2式より，ν' を消去し，γ 線のはじめのエネルギー $h\nu$ を m_{P}，u_{P}，c を用いて表すと，$h\nu=\boxed{\ 4\ }$ となる。こうして求めた γ 線のエネルギーは，それまでに知られていた γ 線のエネルギーよりはるかに大きくなった。また，${}^{14}_{7}\mathrm{N}$に衝突した場合に求めたものと一致しないこともわかった。

1932年にチャドウィックは，この放射線を未知の粒子と考えた。この粒子が静止している原子核に正面から弾性衝突をするとき，衝突後の原子核の速さは最大になる。放射線粒子（質量 m）が速さ V で質量 m_{P} の${}^{1}_{1}\mathrm{H}$に正面から当たるとき，放射線粒子の初めの速度の向きを正にとり，衝突後の放射線粒子の速度を u，${}^{1}_{1}\mathrm{H}$の速度を u_{P} とすると，運動量保存の法則より，$mV=\boxed{\ 5\ }$ となる。また，弾性衝突であるので，$\dfrac{\boxed{\ 6\ }}{V}=1$ である。m と m_{P} の比 $\dfrac{m}{m_{\mathrm{P}}}$ を x とおき，V を x と u_{P} で表すと $V=\boxed{\ 7\ }$ となる。同様にして，放射線粒子が同じ速さ V で${}^{14}_{7}\mathrm{N}$に当たるとき，${}^{14}_{7}\mathrm{N}$の質量を${}^{1}_{1}\mathrm{H}$の質量の14倍として，同じような式を求めることができる。衝突後の${}^{14}_{7}\mathrm{N}$の速度を u_{N} とし，V を x と u_{N} で表すと，$V=\boxed{\ 8\ }$ となる。これより，x を u_{P} と u_{N} を使って表すと，$x=\boxed{\ 9\ }$ となる。この u_{P} に $3.3\times10^{7}\,\mathrm{m/s}$，$u_{\mathrm{N}}$ に $4.4\times10^{6}\,\mathrm{m/s}$ を代入すると，$x=\boxed{\ 10\ }$ となり，未知の放射線粒子の質量がわかった。この放射線粒子は中性子（${}^{1}_{0}\mathrm{n}$）と呼ばれている。この場合の${}^{4}_{2}\mathrm{H}$と${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$との原子核反応を式で

表すと

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \boxed{11}$$

$\boxed{1}$の解答群

① $^{12}_{5}\mathrm{B}$　② $^{13}_{6}\mathrm{C}$　③ $^{13}_{5}\mathrm{B}$　④ $^{12}_{6}\mathrm{C}$

$\boxed{2}$の解答群

① $m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}-\dfrac{hc}{\nu}$　② $m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}+\dfrac{h\nu}{c}$　③ $m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}-\dfrac{h\nu'}{c}$　④ $m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}-\dfrac{h\nu}{c}$

$\boxed{3}$の解答群

① $h\nu+m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}$　② $h\nu'+m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}$　③ $h\nu+\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2$　④ $h\nu'+\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2$

$\boxed{4}$の解答群

① $\dfrac{1}{4}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2+\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}cu_\mathrm{P}$　② $\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2+\dfrac{1}{4}m_\mathrm{P}cu_\mathrm{P}$　③ $\dfrac{1}{4}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2+\dfrac{1}{4}m_\mathrm{P}cu_\mathrm{P}$

④ $\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2+\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}cu_\mathrm{P}$

$\boxed{5}$の解答群

① $mu+m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}$　② $mu-m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}$　③ $\dfrac{1}{2}mu^2+\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2$

④ $\dfrac{1}{2}mu^2-\dfrac{1}{2}m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}{}^2$

$\boxed{6}$の解答群

① $m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}-mu_\mathrm{P}$　② $m_\mathrm{P}u-m_\mathrm{P}u_\mathrm{P}$　③ $u_\mathrm{P}-u$　④ $u-u_\mathrm{P}$

$\boxed{7}$の解答群

① $\dfrac{x+1}{x}u_\mathrm{P}$　② $\dfrac{x+1}{2x}u_\mathrm{P}$　③ $\dfrac{x+2}{x}u_\mathrm{P}$　④ $\dfrac{2x+1}{x}u_\mathrm{P}$

$\boxed{8}$の解答群

① $\dfrac{x+14}{x}u_\mathrm{N}$　② $\dfrac{x+14}{2x}u_\mathrm{N}$　③ $\dfrac{x+2}{14x}u_\mathrm{N}$　④ $\dfrac{2x+1}{x}u_\mathrm{N}$

9 の解答群

① $\dfrac{u_N - u_P}{u_P + u_N}$　② $\dfrac{14u_N - u_P}{u_P + u_N}$　③ $\dfrac{14u_N - u_P}{u_P - u_N}$　④ $\dfrac{u_N - u_P}{u_P - 14u_N}$

10 の解答群

① 1.0　② 2.0　③ 4.0　④ 8.0

11 の解答群

① $^{12}_{5}B$　② $^{13}_{6}C$　③ $^{13}_{5}B$　④ $^{12}_{6}C$

＜ Note ＞

第10講　解答

1

(1)　はじめに電子と陽電子は静止していたので全運動量は０であり，運動量保存則により，反応によって生じた２つの粒子の全運動量も０となる。よって反応により２つの γ 線が生じれば，それらは互いに逆向きで同じ大きさの運動量を持つことになり，正反対の向きに放出されることになる。

(2)　$p_1 = mc$，$\nu_1 = \dfrac{mc^2}{h}$　　(3)　$P_x = p_A - p_B\cos\theta$，$P_y = p_B\sin\theta$

(4)　$p_A = mc + \dfrac{1}{2}P_x$，$p_B = mc - \dfrac{1}{2}P_x$　　(5)　$P_x = \dfrac{2h}{c}(\nu_A - \nu_1)$

2

問１　ア　$p_A = p_e$　　イ　$\dfrac{{p_e}^2}{2m_e}$

ウ　$\dfrac{m_A Q}{m_A + m_e}$　　エ　$p_\nu \sin\phi - p_e\sin\theta = 0$

オ　$p_\nu\cos\phi + p_e\cos\theta = -p_A$　（エ，オは順不同）

カ　$\dfrac{{p_A}^2}{2m_A} + \dfrac{{p_e}^2}{2m_e} + \dfrac{{p_\nu}^2}{2m_\nu}$　　キ　$\sqrt{2(1+\cos\phi)}$　または　$2\cos\dfrac{\phi}{2}$

問２　1.8×10^4 [eV]

3

(1)　$G\dfrac{Mm_H}{R}$

(2)　$\dfrac{1}{56}(56m_H - m_{Fe})c^2$

(3)　$\dfrac{(56m_H - m_{Fe})c^2R^2}{GMm_{Fe} - (56m_H - m_{Fe})c^2R}$

(4)　4×10^{-2}

(5)　白色矮星の場合，半径が大きくその表面付近での万有引力も小さいので，反応で生じた鉄原子が星の重力を振り切って無限遠へ到達することができる。しかし中性子星の場合，その半径が小さく表面付近での万有引力が非常に大きくなっており，重力を振り切って抜け出すのに必要なエネルギーも非常に大きくなるので，反応で生じた鉄原子が到達できる距離が有限となり，放出が観測されない。

第10講　確認テスト

【解答】

1　②　　2　③　　3　④　　4　①　　5　①

6　③　　7　②　　8　②　　9　③　　10　①　　11　④

【解説】

1　反応前後の原子番号と質量数は保存するので

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow \underline{{}^{13}_{6}\mathrm{C}} + \gamma$$

2　運動量保存則は

$$\frac{h\nu}{c} = \underline{-\frac{h\nu'}{c} + m_{\mathrm{P}}u_{\mathrm{P}}} \quad \text{——Ⓐ}$$

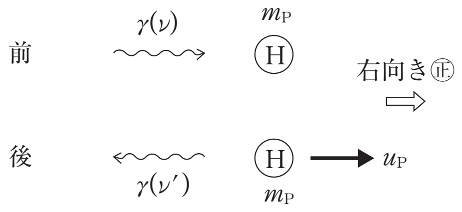


図1

3　エネルギー保存則

$$h\nu = \underline{h\nu' + \frac{1}{2}m_{\mathrm{P}}u_{\mathrm{P}}^{2}} \quad \text{——Ⓑ}$$

4　Ⓐ×c＋Ⓑより

$$2h\nu = 0 + c\cdot m_{\mathrm{P}}u_{\mathrm{P}} + \frac{1}{2}m_{\mathrm{P}}u_{\mathrm{P}}^{2}$$

$$\therefore \quad h\nu = \underline{\frac{m_{\mathrm{P}}u_{\mathrm{P}}}{2}\left(c + \frac{u_{\mathrm{P}}}{2}\right)}$$

5　運動量保存則より

$$mV = \underline{mu + m_{\mathrm{P}}u_{\mathrm{P}}} \quad \text{——Ⓒ}$$

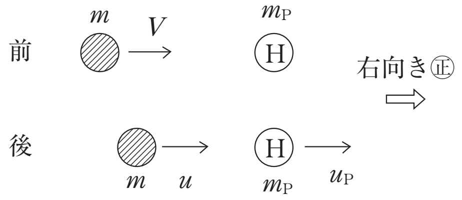


図2

6　はね返り係数が1ゆえ

$$(-1)(V-0) = u - u_{\mathrm{P}} \quad \text{——Ⓓ}$$

$$\therefore \quad \underline{\frac{u_{\mathrm{P}} - u}{V}} = 1$$

7　Ⓒ－Ⓓ×mより，（uを消す！）

$$2mV = (m + m_{\mathrm{P}})u_{\mathrm{P}}$$

$$\therefore \quad V = \frac{m + m_{\mathrm{P}}}{2m}u_{\mathrm{P}} = \frac{1 + \dfrac{m}{m_{\mathrm{P}}}}{2\dfrac{m}{m_{\mathrm{P}}}}u_{\mathrm{P}} = \underline{\frac{1+x}{2x}u_{\mathrm{P}}} \quad \text{——Ⓔ}$$

8　Ⓔの計算で，$m_{\mathrm{P}} \to 14m_{\mathrm{P}}$，$u_{\mathrm{P}} \to u_{\mathrm{N}}$とすればよい．

$$\therefore \quad V = \frac{m + 14m_{\mathrm{P}}}{2m}u_{\mathrm{N}} = \underline{\frac{14+x}{2x}u_{\mathrm{N}}} \quad \text{——Ⓕ}$$

9　ⒺⒻより

$$\frac{1+x}{2x}u_{\mathrm{P}} = \frac{14+x}{2x}u_{\mathrm{N}} \qquad \therefore \quad x = \underline{\frac{14u_{\mathrm{N}} - u_{\mathrm{P}}}{u_{\mathrm{P}} - u_{\mathrm{N}}}}$$

10　９の式に数値を代入して，

$$x=\frac{14\times4.4\times10^{6}-3.3\times10^{7}}{3.3\times10^{7}-4.4\times10^{6}}=\underline{1.0}$$

11

$${}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{9}_{4}\mathrm{Be}\longrightarrow{}^{1}_{0}\mathrm{n}+\underline{{}^{12}_{6}\mathrm{C}}$$